

**Т. Г. БАБАК, О. О. ГОЛУБКИНА, Є. Д. ПОНОМАРЕНКО, Л. В. СОЛОВЕЙ, Г. Л. ХАВІН**

### **ІНТЕГРАЦІЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ ВИПАРНОЇ УСТАНОВКИ КОНЦЕНТРУВАННЯ СИРОПУ СОРГО З ВИКОРИСТАННЯМ ПІНЧ-АНАЛІЗУ**

У статті розглянуто модернізацію системи підігрівачів сиропу сорго перед концентруванням у випарній установці. Процес випарювання є одним з найбільш енергоємних процесів хімічної технології, тому організація рекуперації тепла в цих процесах – це актуальна задача, особливо враховуючи високі ціни на зовнішні енергоносії. Для рішення задачі, що поставлена, було використано методи пінч-аналізу. На підставі розрахунків теплового та матеріального балансів було виділено теплові потоки для теплової інтеграції. За допомогою складених кривих і сіткової діаграми було проведено аналіз існуючого проекту і виявлено недоліки запропонованої системи рекуперації тепла, а саме, порушення мінімальної температурної різниці в теплообмінних апаратах та перенос тепла через пінч. Це тягне за собою як збільшення капітальних витрат, так і витрат на зовнішні енергоносії. На основі принципів пінч-аналізу було розроблено альтернативний проект інтеграції теплових потоків, що реалізує максимальну рекуперацію тепла для економічно та технологічно обґрунтованого значення мінімальної температурної різниці в мережі теплообмінників  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ . Для технічної реалізації модернізованої схеми було підібрано та розраховано додаткові пластинчаті теплообмінники. Пропозиції щодо покращення теплової схеми містять у собі забезпечення економії споживання гарячої утиліти (пари, що гріє), холодної утиліти (охолоджуючої води), підвищення загальної ефективності від використання модернізованої схеми. Техніко-економічний аналіз запропонованого проекту модернізації показав зниження споживання зовнішніх енергоносіїв в 1,43 рази в порівнянні з вихідним проектом. При практично однаковому терміні окупності альтернативний проект дозволяє отримати чистий річний прибуток на 42 % більше, ніж існуючий проект.

**Ключові слова:** рекуперація енергії, пінч-аналіз, випарна установка, пластинчаті теплообмінники.

### **Т. Г. БАБАК, О. А. ГОЛУБКИНА, Е. Д. ПОНОМАРЕНКО, Л. В. СОЛОВЕЙ, Г. Л. ХАВИН ИНТЕГРАЦИЯ ТЕПЛОВИХ ПОТОКОВ ВЫПАРНОЙ УСТАНОВКИ КОНЦЕНТРИРОВАНИЯ СИРОПА СОРГО С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПИНЧ-АНАЛИЗА**

В статье рассмотрена модернизация системы подогревателей сиропа сорго перед концентрированием в выпарной установке. Процесс выпаривания является одним из наиболее энергоемких процессов химической технологии, поэтому организация рекуперации тепла в этих процессах – это актуальная задача, особенно при высоких ценах на внешние энергоносители. Для решения поставленной задачи были применены методы пинч-анализа. На основании расчета теплового и материального балансов выпарной установки были выделены тепловые потоки для тепловой интеграции. С помощью составных кривых потоков процесса и сеточной диаграммы был проведен анализ существующего проекта и выявлены недостатки предлагаемой системы рекуперации тепла, а именно, нарушение минимальной разности температур в теплообменных аппаратах и перенос тепла через пинч. Это влечет за собой как увеличение капитальных затрат, так и затрат на внешние энергоносители. На основе принципов пинч-анализа был разработан альтернативный проект интеграции тепловых потоков, реализующий максимальную рекуперацию тепла для экономически и технологически обоснованного значения минимальной разности температур в сети теплообменников  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ . Для технической реализации модернизированной схемы были подобраны и рассчитаны дополнительные пластинчатые теплообменники. Предложения по улучшению тепловой схемы включают в себя обеспечение экономии потребления горячей утилиты (греющего пара), холодной утилиты (охлаждающей воды), повышение общей эффективности от использования модернизированной схемы. Технико-экономический анализ предложенного проекта модернизации показал снижение потребления внешних энергоносителей в 1,43 раза по сравнению с исходным проектом. При практически одинаковом сроке окупаемости, альтернативный проект позволит получить чистую годовую прибыль на 42 % больше, чем существующий проект.

**Ключевые слова:** рекуперация энергии; пинч-анализ; выпарная установка; пластинчатые теплообменники.

### **T. BABAK, O. HOLUBKINA, Y. PONOMARENKO, L. SOLOVEY, G. KHAVIN THE HEAT STREAMS INTEGRATION OF THE MULTI-EFFECT EVAPORATOR SYSTEM FOR CONCENTRATING OF SORGHUM SYROP BY USING PINCH-ANALYSIS**

The modernization of the sorghum syrup heating process before concentrating in the multi-effect evaporator is considered in the paper. Process of evaporation is one of the most power-intensive processes of chemical technology therefore the organization of heat recovery in these processes is a relevant task, especially taking into account high prices of external energy carriers. Pinch-analysis methods have been applied to the solution of the objective. Thermal and material balances of evaporator system have been calculated, process streams for heat integration have been identified and their data have been extracted. By means of the process streams composite curves and the grid diagram the analysis of the existing project has been carried out and shortcomings of the offered system of heat recover, namely, violation of the minimum temperature difference in heat exchange equipment and heat transfer across the pinch has been revealed. It involves both increase in capital expenditure, and costs of external energy carriers. On the basis of the pinch-analysis principles the alternative design of the process streams heat integration, that realizes the maximum energy recovery for economically and technologically reasonable value of the minimum temperature difference in heat exchange network  $\Delta T_{\min} = 5^\circ\text{C}$ , has been developed. For technical implementation of the upgraded scheme additional plate heat exchangers have been chosen and calculated. Propositions for improving the heat scheme include saving of the hot utility (steam) and cold utility (cooling water) consumptions, increasing overall efficiency by using the upgraded scheme have been made. The technical and economic analysis of the proposed design showed a 1.43-fold decrease in the of external energy consumption in comparison with the initial design. At almost identical payback period, the alternative design will allow to get net annual profit 42 % more, than the existing design.

**Keywords:** energy recovery; pinch analysis; evaporator station; plate heat exchangers.

**Введение.** Выпаривание в многокорпусной выпарке является, как правило, наиболее энергетически затратным в технологическом процессе получения сахарного раствора. Поэтому исследования, направленные на снижение расхода энергии и повышение уровня рекуперации, являются по-прежнему актуальными,

как с точки зрения снижения себестоимости выпускаемой продукции, так и с точки зрения уменьшения выбросов и экологической безопасности. Возможности оптимального и рационального проектирования многокорпусных выпарных установок, пути экономии энергии были особенно тщательно изучены примени-

© Т.Г. Бабак, О.О. Голубкина, Є.Д. Пономаренко, Л.В. Соловей, Г.Л. Хавін, 2018

тельно к установкам в сахарной промышленности [1–3]. Для изучения процесса интеграции тепловых потоков наибольшее распространение получили методы пинч-анализа [4,5], которые позволяют на стадии за-проектировать сеть рекуперативных теплообменников, чтобы максимально использовать тепловую энергию потоков системы (рекуперацию).

Для определения путей экономии энергии исследователями были проведены работы по общему анализу тепловой схемы сахарного завода в целом [6–8]. Также имеются примеры исследований отдельных отделений подготовки производства или отделений вспомогательных производств, обеспечивающих функционирования основного технологического процесса [9,10].

Это позволило учесть особенности данного производства при применении принципов пинч-анализа для интеграции тепловой схемы выпарных станций с учетом работы вспомогательного оборудования [11,12].

#### Описание выпарной установки и выбор технологических потоков для рекуперации тепла.

Общая формулировка задачи состоит в создании промышленной установки по концентрации очищенного первичного сиропа сорго. Сироп сорго или сорговый мед по своим физико-химическим свойствам близок к классическому сахарному сиропу, производится экологическим способом из сахарного сорго [13].

Главной целью проекта является модернизация проекта выпарной станции концентрации сиропа сорго с целью улучшения показателей работы. Предложения по улучшению включают в себя обеспечение экономии потребления горячего теплоносителя (горя-

чей утилиты – пара), охлаждающей воды (холодной утилиты), повышение общей эффективности от использования модернизированной схемы.

Для реализации поставленной цели методами пинч-анализа предусмотрено выполнение следующих инженерных и математических расчетов:

- построение составных кривых технологических потоков на температурно-энтальпийной диаграмме;
- определение минимальной требуемой мощности горячих и холодных утилит и точки пинча для выбранного значения  $\Delta T_{\min}$ ;

– анализ недостатков, если таковые имеются в изначально спроектированной теплообменной сети процесса;

– проектирование сети теплообменников, обеспечивающей максимальную рекуперацию тепла и минимальное потребление внешних источников энергии (утилит).

Принципиальная схема установки представлена на рис. 1.

Необходимо спроектировать выпарную станцию для сгущения сиропа сорго начальной концентрацией СВ=16 % до концентрации СВ=70 %. Исходный раствор (сироп сорго) имеет начальную температуру 20°C и расход 2000 кг/ч. В качестве основного греющего теплоносителя предусмотрено использование насыщенного пара с температурой 140°C.

Анализ данных существующей схемы, расчет материального и теплового балансов позволяет выделить технологические потоки для проведения реконструкции. Данные потоков приведены в табл. 1.

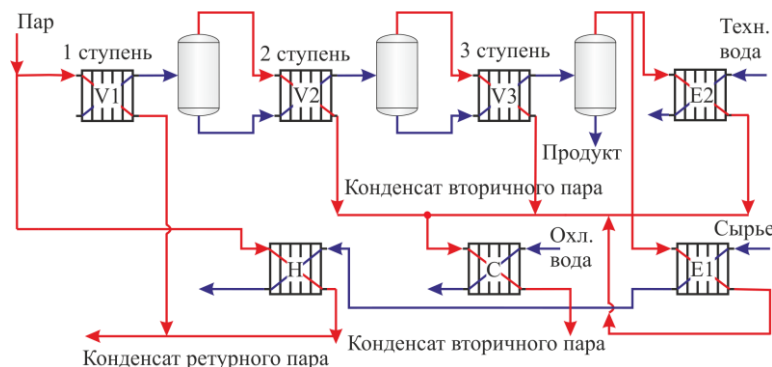


Рис. 1 – Общая схема предлагаемого проекта выпарной станции для сгущения сиропа сорго

Таблица 1 – Данные технологических потоков выпарной установки для интеграции

N	Название	Тип	$T_s, ^\circ\text{C}$	$T_p, ^\circ\text{C}$	$g, \text{кг/с}$	$CP, \text{кВт/}^\circ\text{C}$	$\Delta H, \text{кВт}$
1	Вторичный пар 1-го корпуса	Горячий	124,5	124,5	0,142	–	310,8
2	Вторичный пар 2-го корпуса	Горячий	107	107	0,144	–	322,3
3	Вторичный пар 3-го корпуса	Горячий	84	84	0,143	–	329,4
4	Конденсат ретурного пара	Горячий	140	100	0,145	0,617	24,7
5	Смесь конденсатов	Горячий	105,1	30	0,429	1,803	135,5
6	Испарение в 1-м корпусе	Холодный	125,5	125,5	0,556	–	310,8
7	Испарение во 2-м корпусе	Холодный	108	108	0,413	–	310,8
8	Испарение в 3-м корпусе	Холодный	85	85	0,269	–	322,3
9	Исходная смесь	Холодный	20	125,5	0,556	2,177	229,7
10	Техническая вода	Холодный	25	55	1,587	6,626	198,8

**Постановка задачи и выбор подхода к решению.** В табл. 1 приняты обозначения:  $T_s$  и  $T_t$  – температура снабжения и целевая температура теплоносителя;  $g$  – массовый расход;  $CP$  – потоковая теплоемкость;  $\Delta H$  – требуемое изменение теплосодержания потока.

Суммарная мощность рекуперации, предложенная к реализации в первоначальном проекте, равна 962,5 кВт. Были построены составные кривые потоков системы (без учета потока конденсата ретурного пара) и расположены на температурно-энтальпийной диаграмме таким образом, чтобы область их перекрытия по оси абсцисс была равна мощности рекуперации, рис. 2.

Расположение составных кривых соответствует значению  $\Delta T_{\min}=16,5^\circ\text{C}$ , то есть разность температур в теплообменниках не должна была бы превышать это значение, если бы они были размещены в соответствии с правилами пинч-анализа. Однако это не так, а именно, в теплообменнике HE1 разность температур теплоносителей на выходе равна  $4^\circ\text{C}$ . Это результат того, что горячий поток из области ниже пинча используется для подогрева холодного потока в области выше пинча. Также в данной системе происходит передача тепла через пинч.

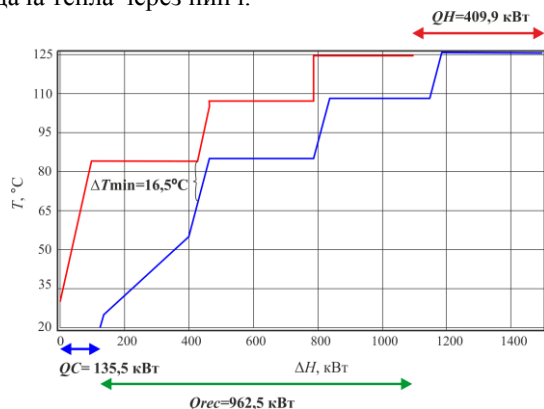


Рис. 2 – Составные кривые потоков процесса: 1 – горячих потоков, 2 – холодных потоков

Для выполнения проекта было выбрано значение  $\Delta T_{\min}=5^\circ\text{C}$ , которое, с одной стороны реализуется в пластинчатых теплообменниках, а с другой не приводит к завышению поверхности теплообмена и, соответственно, падению линейной скорости движения теплоносителей в каналах. Это существенно в данном процессе, где одним из теплоносителей является сироп сорго, который по аналогии с сахарным сиропом, склонен к достаточно интенсивному загрязнению поверхности теплообмена при низких скоростях теплоносителей в каналах.

Для выбранного значения  $\Delta T_{\min}=5^\circ\text{C}$  были построены составные кривые, уже с учетом потока конденсата ретурного пара, энергию которого можно использовать.

Схема без рекуперации энергии должна потреблять мощность пара 540,5 кВт, мощность охлаждающей воды – 334, 2 кВт. Схема рекуперации исходного проекта снижает мощность потребляемого пара до

409, 9 кВт, охлаждающей воды – до 135, 5 кВт. Проект с использованием принципов пинч-анализа (рис. 3) дает снижение потребляемой мощности пара до 349,3 кВт, воды – до 99,5 кВт. Таким образом, экономия мощности пара по первоначальному и альтернативному проектам составит 130,6 кВт и 191,2 кВт, воды – 198,8 кВт и 234,7 кВт соответственно.

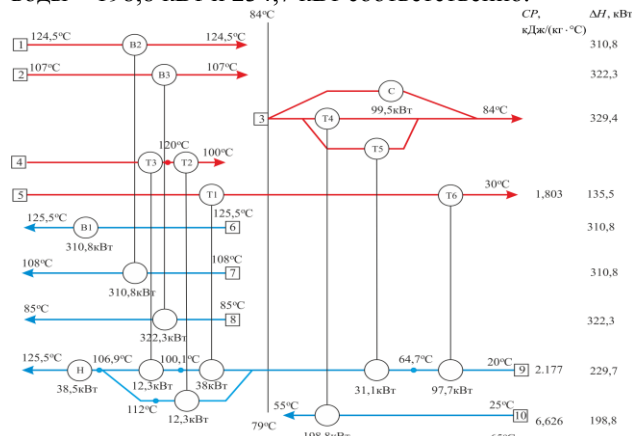


Рис. 3 – Сетчатая диаграмма с установленными теплообменниками для значения  $\Delta T_{\min}=5^\circ\text{C}$

**Выводы.** Анализ экономической эффективности проекта рекуперации энергии для установки выпаривания сиропа сорго показал следующее:

1. Предложенный проект, разработанный с использованием принципов пинч-анализа, обеспечивает экономию потребления холодной утилиты (охлаждающей воды) 35,9 кВт, горячей утилиты (пара) – 60,5 кВт по отношению к первоначальному проекту. При процентной ставке налога 18 % реализация проекта окупится через 9 месяцев.

2. В результате реализации проекта годовая балансовая прибыль и чистая годовая прибыль предприятия планируется больше на 42 %, при практически одинаковом сроке окупаемости.

3. Применение пинч-анализа позволило разработать более эффективный экономически и технически проект процесса предварительного подогрева сиропа сорго перед выпариванием.

#### Список литературы

- Westphalen D. L. Optimization of bleed streams in evaporation systems based on pinch analysis: new approach [Text] / D. L. Westphalen M. R. Wolf Maciel // Computer Aided Chemical Engineering, 2000. 8. P. 997–1002.
- Perin-Levasseur Z. Energy integration study of a multi-effect evaporator / Z. Perin-Levasseur, V. Palese, F. Marechal [Text] // Energy integration study of a multi-effect evaporator, PRES08: 11th Conference Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction, Praha (Czech Republic), August 24–28, 2008.
- Higa M. Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant / M. Higa, A. J. Freitas, A. C. Bannwart, R. J. Zemp [Text] // Applied Thermal Engineering, 2009. 29. P. 515–522.
- Kemp I. C. Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy [Text] / I. C. Kemp // Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 2006. 396 p.
- Смит Р. Основы интеграции тепловых процессов / Р. Смит, Й. Клемеш, Л. Л. Тобажнянский, П. А. Капустенко, Л. М. Ульев

- [Текст] // Харьков. НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ», 2000. 458 с.
- Barambu N. U. A. Energy Integration of Sugar Production Plant Using Pinch Analysis: A Case Study of Savanah Sugar Company Yola [Text] / N.U. Barambu, U.A. El-Nafaty, I.A. Saeed // Advances in Applied Science Research, 2017. 8(2). P. 20–29.
  - Tovazhnyanski L. L. Heat Integration Improvement for Eastern European Countries Sugar-Plant [Text] / L. L. Tovazhnyanski, P. A. Kapustenko, L. M. Ulyev, S. A. Boldyrev // Proceedings of 15th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2002, Prague, 2002, Summaries Vol. 4., System Engineering, Prague. 2002. P. 251. (Paper No. P5. 69. p. 19).
  - Товажнянский Л. Л. Тепловая интеграция и энергосбережение в сахарной промышленности [Текст] / Л. Л. Товажнянский, П. А. Капустенко, Л. М. Ульев, С. А. Болдырев // Вестник НТУ «ХПИ». Харьков: НТУ «ХПИ», 2002. 9. Т. 1. С. 94–105.
  - Арсеньева О. П. Модернизация системы подогревателей установленных подогревателей сахарного сока [Текст] / О. П. Арсеньева, Т. Г. Бабак, А. В. Демирский, Г. Л. Хавин // Научные труды ОНАХТ, 2011. 39. Т. 2. С. 151–155.
  - Демирский А. В. Модернизация системы подогревателей сахарного сока с учетом загрязнений теплообменной поверхности [Текст] / А. В. Демирский, Л. Л. Товажнянский, О. П. Арсеньева, Г. Л. Хавин, П. А. Капустенко // Интегрированные технологии и энергосбережение. 2013. 2. С. 14–17.
  - Бабак Т. Г. Повышение энергоэффективности работы станции упаривания сахарного сиропа [Текст] / Т. Г. Бабак, О. А. Голубкина, Д. С. Король, Е. Д. Пономаренко // Вестник НТУ «ХПИ», 2017. 18 (1240). P. 46–52.
  - Lambert, C. Simulation of a sugar beet factory using a chemical engineering software (ProSimPlus®) to perform Pinch and exergy analysis [Text] / C. Lambert, B. Laulan, M. Decloux, H. Romdhana, F. Courtois // Journal of Food Engineering, 2018. 225. P. 1–11.
  - Eggleston, G. New Commercially Viable Processing Technologies for the Production of Sugar Feedstocks from Sweet Sorghum for Manufacture of Biofuels and Bioproducts. Review article [Text] / G. Eggleston, M. Cole, B. Andrzejewski // Sugar Technology, 2013. 15(3). P. 232–249.
  - Energy Saving and Pollution Reduction, Praha (Czech Republic), August 24–28, 2008.
  - Higa M. Thermal integration of multiple effect evaporator in sugar plant / M. Higa, A. J. Freitas, A. C. Bannwart, R. J. Zemp [Text] // Applied Thermal Engineering, 2009. 29. P. 515–522.
  - Kemp I. C. Pinch Analysis and Process Integration. A User Guide on Process Integration for the Efficient Use of Energy [Text] / I. C. Kemp // Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, UK 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 2006. 396 p.
  - Smit R., Klemesh Y., Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. A., Ulyev L. M. (2000). Osnovy integratsii teplovykh protsessov [Tekst]. Kharkov. NTU «KhPI», 458.
  - Barambu N. U., El-Nafaty U. A., Saeed I. A. (2017). Energy Integration of Sugar Production Plant Using Pinch Analysis: A Case Study of Savanah Sugar Company Yola [Text]. Advances in Applied Science Research, 8(2), 20–29.
  - Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. A., Ulyev L. M., Boldyrev S. A. (2002). Heat Integration Improvement for Eastern European Countries Sugar-Plant [Text]. Proceedings of 15-th International Congress of Chemical and Process Engineering, CHISA'2002, Prague, 2002, Summaries, 4, 251.
  - Tovazhnyanskyy L. L., Kapustenko P. A., Ulyev L. M., Boldyrev S. A. (2002). Teplovaya integratsiya i energosberezheniye v sakharnoy promyshlennosti [Tekst]. Vestnik NTU «KhPI». 1. p. 94–105.
  - Arsenyeva, O.P., Babak, T.G., Demirskyy, A.V., Khavin, G.L. (2011). Modernizatsiya sistemy posledovatelno ustanovlennykh podogrevateley sakharnogo soka [Tekst]. Nauchnyye trudy ONAKhT, 39, 2, 151–155.
  - Demirskyy, A.V., Tovazhnyanskyy, L.L., Arsenyeva, O.P., Khavin, G.L., Kapustenko, P.A. (2013). Analiz raboty sistemy podogrevateley sakharnogo soka s uchetom zagryazneniy teploobmennoy poverkhnosti [Tekst]. Integrirovannyye tekhnologii i energosberezheniye, 2, 14–17.
  - Babak, T.G., Holubkina, O.A., Korol, D.S., Ponomarenko, E.D. (2017). Povysheniye energoeffektivnosti raboty stantsii uparivaniya sakharnogo siropa [Tekst]. Vestnik NTU «KhPI», 18 (1240), 46–52.
  - Lambert, C., Laulan, B., Decloux, M., Romdhana, H., Courtois, F. (2018). Simulation of a sugar beet factory using a chemical engineering software (ProSimPlus®) to perform Pinch and exergy analysis [Text]. Journal of Food Engineering, 225, 1–11.
  - Eggleston, G., Cole, M., Andrzejewski, B. (2013). New Commercially Viable Processing Technologies for the Production of Sugar Feedstocks from Sweet Sorghum for Manufacture of Biofuels and Bioproducts. Review article [Text]. Sugar Technology, 15(3), 232–249.

#### References (transliterated)

Надійшла (received) 03.10.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Бабак Тетяна Геннадіївна (Бабак Татьяна Геннадиевна, Babak Tatiana Gennadiivna)** – доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2944-5110>; e-mail: [tgabak@gmail.com](mailto:tgabak@gmail.com).

**Голубкіна Ольга Александрівна (Голубкіна Ольга Олександрівна, Holubkina Olga)** – старший викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4515-8533>; e-mail: [oalgolubkina@gmail.com](mailto:oalgolubkina@gmail.com).

**Пономаренко Євгенія Дмитрівна (Пономаренко Євгенія Дмитрівна, Ponomarenko Yevgeniya)** – доцент кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9878-6093>; e-mail: [evgenia.ponomarenko@gmail.com](mailto:evgenia.ponomarenko@gmail.com).

**Соловей Людмила Валентинівна (Соловей Людмила Валентиновна, Solovey Ludmila Valentynivna)** – ст. викладач кафедри інтегрованих технологій, процесів та апаратів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5308-6782>; e-mail: [ludsol@ukr.net](mailto:ludsol@ukr.net).

**Хавин Геннадій Львович (Хавін Геннадій Львович, Khavin Gennadii)** – д.т.н., професор кафедри технології машинобудування та металорізальних верстатів, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4340-7615>; e-mail: [gennadii.khavin@gmail.com](mailto:gennadii.khavin@gmail.com).